

ARTICLE PRINCIPAL

recouvrant

LA THESE DE DOCTORAT ES SCIENCES PHYSIQUES

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES

de PARIS

par

Michel PICQ

pour obtenir

le grade de Docteur Es-Sciences

Sujet de la Thèse : Mesure calorimétrique de l'activité des sources
Y intenses, des doses absorbées et des facteurs
build-up.

soutenue le 7.3.67

devant la Commission d'Examen

MM. Jean TEILLAC

Président

Marc LEFORT

Examineurs

Maurice DUQUESNE

Marcel LECOIN.

INSTITUT DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE

(Professeur Jean TEILLAC)

11, rue Pierre-Curie, Paris V^e

MESURE CALORIMÉTRIQUE DE L'ACTIVITÉ DES SOURCES γ INTENSES, DES DOSES ABSORBÉES ET DES FACTEURS BUILD-UP

Par

MICHEL PICQ (*)

SOMMAIRE

Nous avons mis au point une méthode expérimentale de microcalorimétrie permettant d'obtenir les faibles énergies perdues par un rayonnement γ dans la traversée d'un écran, en mesurant la quantité de chaleur dégagée.

Cette méthode permet de déterminer la valeur de la self-absorption et l'intensité absolue des sources ou nombre de photons primaires émis au sein de la matière radioactive.

Dans nos conditions expérimentales (self-absorption et épaisseurs traversées importantes) le rayonnement subit de multiples diffusions et dégradations dans la source et les écrans. Nous proposons une représentation des résultats en termes de build-up d'énergie absorbée ou rapport de la dose absorbée intégrale, que nous mesurons directement, et de l'énergie cédée par les photons primaires.

Nous avons ainsi étudié des sources de ^{198}Au et ^{60}Co et l'absorption de leur faisceau γ dans l'or, le nickel, le graphite.

SUMMARY

We have set up a calorimetric method whereby we measure the weak energy losses of gamma radiation through a screen by measuring the emitted quantity of heat.

This method makes it possible to determine the value of the self-absorption and the absolute intensity of the sources, i. e. the number of primary photons emitted within the radioactive sample.

With our experimental conditions—large self-absorption and large thickness of the screens—the radiation is subject to a large number of scatterings and degradations in the sources and the screens. We propose a representation of the results in terms of a build-up of the absorbed energy i. e. the ratio of the integral absorbed dose which we measure directly and the energy yielded by the primary photons.

We have studied in this fashion ^{198}Au and ^{60}Co sources and the absorption of their gamma radiation in gold, nickel and graphite.

Nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance à M. le Professeur Teillac, qui a bien voulu nous accueillir dans son laboratoire, et à M. Lecoïn, Maître de Recherches au C. N. R. S., qui a dirigé notre travail.

Nous remercions M. Robert, pour l'aide compétente qu'il nous a apportée.

(*) Article principal recouvrant la thèse de Doctorat

ès Sciences physiques présentée à la Faculté des Sciences de Paris par Michel Picq, pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences, soutenue le 7 mars 1967 devant la commission d'examen. MM. Jean TEILLAC, *Président* ; Marc LEFORT, Maurice DUQUESNE, Marcel LECOÏN, *Examineurs*.
N° d'enregistrement au C. N. R. S. AO 1293.

Dans les travaux sur les effets des rayonnements γ intervient la quantité d'énergie absorbée dans une masse connue de matière irradiée ; cette énergie est due essentiellement aux électrons secondaires qui provoquent l'ionisation et l'excitation des atomes et molécules du milieu absorbant.

La famille des radiations secondaires produites par les photons γ est extrêmement complexe en raison de la dégradation des rayonnements diffusés dans des interactions multiples.

On peut calculer ou mesurer l'énergie perdue par les photons primaires dans des épaisseurs suffisamment faibles pour que les interactions simples soient les plus probables.

Mais pour des épaisseurs de matière plus importantes, il n'est plus possible de négliger l'énergie communiquée par le rayonnement diffusé. On définit alors un facteur build-up qui caractérise la transmission de tous les photons du faisceau en fonction de celle des photons

primaires. La connaissance précise du facteur build-up suppose une bonne sensibilité du détecteur au spectre des photons transmis avec des énergies variables.

Certains expérimentateurs s'intéressent principalement à l'énergie absorbée. La calorimétrie permet de l'obtenir directement en mesurant la chaleur dégagée dans un écran de masse connue.

Ce travail comprend donc trois parties :

1° Mise au point d'une méthode de microcalorimétrie γ permettant d'obtenir l'énergie perdue par un rayonnement γ dans la traversée d'un écran ;

2° Pour des sources intenses, dont le rayonnement transmis est toujours perturbé par une self-absorption non négligeable, détermination de l'intensité absolue, c'est-à-dire du nombre des photons primaires qui sont émis ;

3° Mesure de l'énergie cédée par un faisceau γ dans différents écrans ; étude des doses absorbées en termes de build-up.

CHAPITRE I

MÉTHODE DE MICROCALORIMÉTRIE γ

Nous avons repris une méthode de microcalorimétrie adiabatique employée au Laboratoire Curie (1) et (2).

Les sources radioactives sont placées dans un calorimètre dont les parois absorbent les rayonnements. On mesure directement l'élévation de température du calorimètre. Dans ce but, on annule tout échange de chaleur avec l'extérieur en maintenant automatiquement la température du milieu ambiant égale à celle du calorimètre à l'aide de deux couples thermoélectriques reliés à un galvanomètre à haute sensibilité en volts et capable de déceler 10^{-4} °C.

Dans toutes les mesures effectuées jusqu'ici, la source était placée à l'intérieur du calorimètre et les rayonnements émis étaient absorbés dans l'angle solide 4π .

Nous avons perfectionné cet appareillage en augmentant sa précision et en l'adaptant à la mesure des rayonnements γ (5).

D'une part, la sensibilité et la précision ont été améliorées par l'adjonction d'un suiveur de spot qui enregistre la position du spot du galvanomètre par rapport au zéro de l'échelle. Des dispositifs automatiques de réchauffement astreignent la température du bain, représentant le milieu ambiant, à suivre celle du calorimètre. Mais, désormais, la régularité du fonctionnement adiabatique est assurée d'une façon permanente, par des ajustements portés aux différents réglages, dès qu'apparaît, sur l'enregistrement, la plus légère déformation.

D'autre part, la complexité des phénomènes d'absorption ne permet pas de calculer avec une bonne précision

l'énergie perdue dans les parois du calorimètre 4π . Nous avons donc mis au point un appareillage de microcalorimétrie γ .

Appareillage de microcalorimétrie γ

Le radioélément à étudier est placé dans un tube métallique à triple paroi (3) et (4). Une circulation d'eau entre les parois du tube enlève les quantités de chaleur produites par l'absorption du rayonnement corpusculaire ; l'épaisseur des parois est suffisante pour que cette absorption soit totale. Un échantillon de matière absorbante placé à l'extérieur du tube, reçoit le rayonnement γ transmis et constitue le calorimètre dont on mesure l'élévation de température.

Pour qu'un tel appareil puisse fonctionner correctement, il faut, qu'à chaque instant, la température de la surface extérieure du tube central soit la même que celle de l'enceinte. Sinon, il y a échange de chaleur entre le milieu ambiant et le calorimètre, dont la température varie en l'absence de toute source radioactive. On peut alors mesurer la quantité de chaleur transmise qui est assimilable à un mouvement propre.

L'introduction du tube central dans l'appareillage a provoqué différents mouvements propres par suite du frottement de l'eau et des particules en suspension sur les parois, d'une attaque chimique des tubes neufs, ou même du passage de bulles d'air au sein du courant d'eau. Tous ces mouvements propres ont été détectés

et annulés à l'aide de filtres ou pièges à gaz et d'un réglage convenable du débit.

Les calorimètres

En principe, n'importe quelle masse de matière peut constituer un calorimètre. Mais pour que la quantité de chaleur mesurée corresponde à l'énergie perdue par le rayonnement, il faut que le calorimètre soit thermiquement isolé. Sinon, des échanges de chaleur peuvent se faire par conductibilité dans les fils des couples, par agitation thermique de l'air de l'enceinte, ou par rayonnement. Expérimentalement, nous les étudions globalement, en provoquant artificiellement une différence de température constante entre le bain et le calorimètre. La mesure des quantités de chaleur transmises et leur comparaison permet de déterminer les conditions optimales d'un bon fonctionnement.

Dans un premier temps, nous avons utilisé des calorimètres constitués simplement par des plaques rectangulaires mobiles qui permettent de tester les conditions de travail à des distances variables de la source, de déterminer la forme et les dimensions susceptibles de présenter un angle solide important et une meilleure utilisation du rayonnement, d'éviter les positions extrêmes ou des échanges de chaleur accidentels peuvent se produire, de vérifier l'isothermie des températures dans toute la masse.

Les conclusions de cette étude nous ont conduits à choisir deux types de calorimètres.

Les calorimètres annulaires ont la forme d'un cylindre creux. Pour une même matière absorbante, plusieurs

calorimètres de même rayon, de même hauteur mais de diverses épaisseurs, permettent d'étudier l'absorption du rayonnement en fonction de cette épaisseur.

Nous avons également construit des manchons qui s'adaptent sur le tube central et qui, associés à un calorimètre détecteur, favorisent l'analyse du rayonnement au plus près de la source.

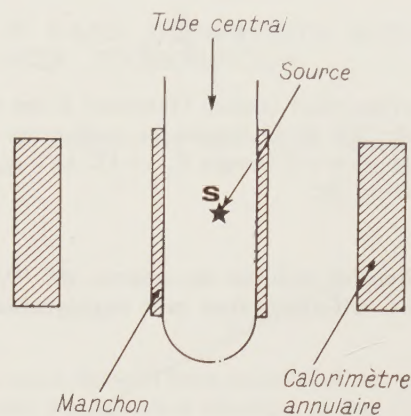


FIG. 1.

Pour un calorimètre de masse m , de chaleur spécifique c , étudié dans les conditions d'adiabaticité définies ci-dessus, la quantité de chaleur Q dégagée par la fraction du rayonnement γ absorbée s'écrit :

$$Q = mc\Delta t,$$

Δt étant l'élévation de température mesurée.

CHAPITRE II

INTENSITÉ D'UNE SOURCE RADIOACTIVE

Ce problème a été résolu pour ^{198}Au et ^{60}Co (6) et (7). Le schéma de désintégration de ces deux radioéléments est parfaitement établi. Le rayonnement γ émis peut être considéré comme monochromatique, l'énergie du quantum étant respectivement de 412 keV et, 1,25 MeV. Le rapport du nombre des photons émis au nombre des désintégrations est connu avec une précision suffisante.

Cas où la self-absorption est négligeable

Soit E , la somme énergétique de tous les rayonnements émis à l'extérieur d'une source radioactive.

L'énergie Q perdue par le rayonnement dans le calorimètre détecteur est proportionnelle :

- à E ,
- à l'angle solide d'utilisation Ω défini par le détecteur,
- à l'expression $1 - \exp(-\lambda'e)$, où e est l'épaisseur du détecteur ⁽¹⁾ et λ' le coefficient d'absorption linéaire (4) correspondant à l'énergie des photons γ et à la nature du détecteur.

On peut donc écrire :

$$Q = mc\Delta t = E\Omega[1 - \exp(-\lambda'e)] \quad [1]$$

En mesurant Δt et en traçant pour des manchons

⁽¹⁾ L'angle solide d'utilisation (environ 70 p. 100) correspondant à un faisceau très ouvert, nous avons dû calculer

une épaisseur moyenne par intégration sur la hauteur des calorimètres.

d'épaisseurs différentes la courbe d'absorption, dont la pente fournit le coefficient λ' , on peut calculer l'énergie globale E du rayonnement émis par la source.

Si on admet que le faisceau est monochromatique et composé de I photons d'énergie E_γ égale à l'énergie connue de la transition, on peut en déduire le nombre de photons émis, c'est-à-dire l'intensité de la source :

$$I = \frac{E}{E_\gamma}.$$

Nous avons ainsi mesuré l'intensité d'une source de ^{198}Au et de ^{60}Co et déterminé les coefficients d'absorption des photons γ d'énergie $E_\gamma = 412 \text{ keV}$ et $1,25 \text{ MeV}$ dans le plomb (5).

Intensité absolue de sources de ^{198}Au de self-absorption non négligeable

Dans ce cas, le faisceau, dont l'énergie totale peut être déterminée par la méthode ci-dessus, est celui qui est émis à l'extérieur de la source. Il est nécessaire d'évaluer la self-absorption pour connaître l'intensité absolue ou nombre de photons émis à l'origine.

Mais par ailleurs le faisceau γ émis par la source n'est plus monochromatique. Il renferme un certain nombre de photons, dont l'énergie s'est trouvée dégradée, par suite d'interactions de type Compton, au sein même de la source. La proportion des photons dégradés croît avec le volume de matière radioactive et le taux d'absorption dans le calorimètre sera d'autant plus grand que l'intensité du rayonnement dégradé sera plus forte.

On peut vérifier expérimentalement ce phénomène en comparant les quantités de chaleur dégagées dans un calorimètre par le rayonnement issu d'une même quantité de noyaux radioactifs, localisée dans plusieurs sources, dont la self-absorption est différente.

Pour cela, nous étudions 4 sources de ^{198}Au , de forme sphérique et de rayon r différent. L'activation est répartie dans toute la masse de la source ; en supposant que la densité d'activation est constante, on peut calculer le parcours moyen d'un rayon γ issu d'un point quelconque ; en intégrant ensuite à la sphère entière on détermine le rayon moyen $\alpha r = 0,75 r$. Dans ces conditions, la source peut être considérée comme ponctuelle.

L'intensité des sources étant l'inconnue de notre problème, nous mesurons pour chacune d'entre elles la quantité de chaleur Q dégagée dans un calorimètre 4π , d'épaisseur suffisante pour absorber les rayons β et la quasi-totalité des rayons γ . Q est directement proportionnel à l'intensité des sources.

Si q est la chaleur mesurée dans un calorimètre annulaire détecteur, dans chaque cas, le rapport :

$$R = \frac{q}{Q}$$

représente bien l'énergie cédée par les photons dans le détecteur pour une même intensité de rayonnement émise à l'origine. On voit sur la figure 2 que R croît avec le rayon de la source donc avec la self-absorption et le nombre de photons dégradés présents dans le faisceau.

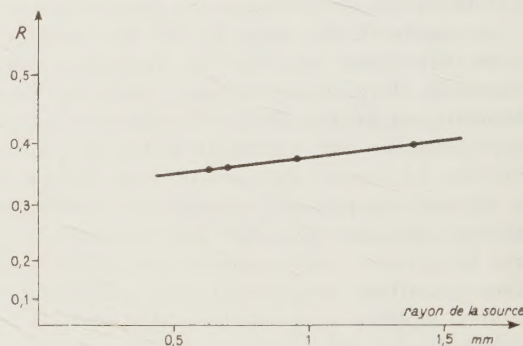


FIG. 2. — Variation de la quantité d'énergie mesurée dans le détecteur pour une même activité et des sources de rayons différents.

En conséquence, le calcul de l'intensité absolue des sources intenses implique l'évaluation de la self-absorption, qui détermine également la nature et les lois d'absorption du faisceau émis.

Dans ces conditions si nous appelons :

— I l'intensité absolue d'une source émettant I photons primaires d'énergie E_γ ,

— λ le coefficient d'absorption linéaire des photons primaires dans la source, mesuré au plus près de celle-ci, par la méthode des manchons, avec une source de rayon r , petit, par rapport au libre parcours moyen des photons,

— αr l'épaisseur de matière donnant une absorption égale à la self-absorption, l'énergie totale, E , transmise après self-absorption est de la forme :

$$E = IE_\gamma \exp(-\lambda \alpha r)$$

et la formule [1] devient :

$$Q = mc\Delta t = IE_\gamma \exp(-\lambda \alpha r) \exp(-\lambda t) [1 - \exp(-\lambda' e)] \Omega \quad [2]$$

Dans cette expression $\exp(-\lambda t)$ représente l'affaiblissement peu important du faisceau dans le tube central. Le coefficient λ' , qui caractérise l'absorption dans le calorimètre annulaire détecteur, est déduit d'une courbe d'absorption déterminée avec des calorimètres d'épaisseurs différentes.

L'intensité absolue I se déduit de l'équation [2].

Nous l'avons mesurée pour des sources de ^{198}Au (0,6 à 3 curies) et une source de ^{60}Co (600 mCi) (1).

Nous déterminons ainsi le nombre de photons pri-

maires émis au sein de la masse radioactive, valeur indispensable pour le calcul des facteurs build-up.

CHAPITRE III

VARIATION DE LA QUANTITÉ D'ÉNERGIE PERDUE DANS DIFFÉRENTS ÉCRANS. FACTEURS BUILD-UP. SECTIONS EFFICACES D'ABSORPTION

La famille des radiations secondaires produites dans la matière est très complexe, en raison des interactions multiples et de natures diverses, qui sont produites, dès que l'écran utilisé n'est pas mince devant le libre parcours moyen des photons (15) à (24) et (30) à (32). Or, la section efficace d'absorption dépend de l'énergie du photon incident qui peut être dégradée dans des diffusions successives (effet Compton). Le calcul du libre parcours moyen et de la direction des photons diffusés implique de nombreuses approximations, qui soulignent l'intérêt des mesures expérimentales. L'analyse du rayonnement transmis, pour en déduire l'énergie perdue, dépend beaucoup de la sensibilité des détecteurs au spectre des énergies photoniques.

La méthode de microcalorimétrie γ , que nous avons mise au point, permet d'obtenir directement l'énergie perdue par un rayonnement qui traverse une masse connue de matière.

Cette énergie, cédée par le rayonnement, et qui comprend l'énergie prélevée sur les photons diffusés, est supérieure à celle que donne le calcul portant sur les photons primaires (8) à (14) et (25). Leur rapport, présenté en termes de build-up (33) et (34) a été étudié en fonction de l'intensité du rayonnement dégradé (27) (28) (35).

Dans ce travail, nous utilisons le build-up d'énergie absorbée B (34), défini comme le rapport de l'énergie cédée par tout le rayonnement, à l'énergie perdue par les seuls photons primaires, dans une interaction simple.

L'énergie perdue par tous les photons ou dose absorbée intégrale, est mesurée directement en calorimétrie. Le calcul de l'intensité absolue des sources, nous donne le nombre des photons primaires. L'énergie perdue par ces photons primaires, qui forment toujours un faisceau monochromatique, peut être déterminée à l'aide des coefficients des tables (9).

Cas d'un rayonnement monochromatique

L'intensité du faisceau est donnée par l'activité de 4 sources de ^{198}Au supposées ponctuelles. L'épaisseur d'absorbant varie comme le rayon moyen des sources.

L'analyse du faisceau est faite par un détecteur annulaire en or.

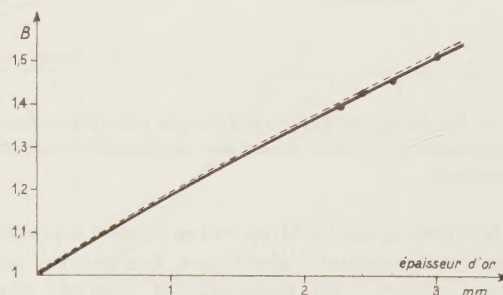


FIG. 3. — Cas d'un rayonnement monochromatique (412 keV) ; variation du build-up d'énergie absorbée en fonction de l'épaisseur de l'écran.

Sur la figure 3, nous avons représenté la variation du build-up en fonction des épaisseurs d'or traversées. En pointillés nous avons reporté les build-up correspondant à l'absorption dans le plomb (34) et (36). Les épaisseurs de plomb ont été réduites en épaisseurs équivalentes d'or ; le coefficient de transformation est le rapport des libres parcours moyens $\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ dans l'or et le plomb.

Dans le cas d'un faisceau γ monochromatique, le build-up, égal à 1 au niveau de la source supposée ponctuelle, croît avec l'épaisseur traversée (29) et la probabilité d'avoir des interactions multiples et des photons dégradés.

Cas d'un rayonnement non monochromatique. Écrans de natures différentes

Le même type de source, de rayon donné, est utilisé tout au long de ces expériences (sources de ^{198}Au , de rayon 0,36 mm, et de plusieurs curies). Le rayonnement est partiellement dégradé par une self-absorption non négligeable. Les détecteurs sont en or, en nickel ou en

(1) Dans le cas du ^{60}Co , nous n'avons pas pu obtenir des sources de rayons différents. Nous avons vérifié expé-

rimentalement (chapitre III) que la self-absorption était négligeable pour la source utilisée.

graphite, et, pour chaque élément absorbant, de diverses épaisseurs.

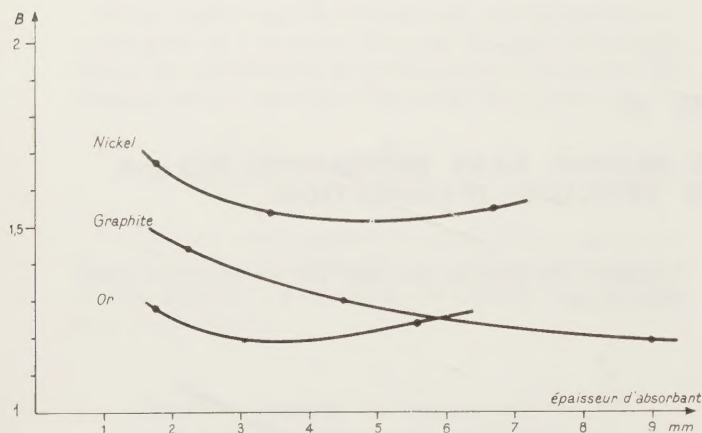


FIG. 4. — Variation du build-up d'énergie absorbée en fonction de l'épaisseur de l'écran. Cas d'un rayonnement non monochromatique.

Sur la figure 4, les build-up obtenus sont reportés en fonction des épaisseurs d'absorbant. Les courbes matérialisent l'influence du rayonnement dégradé sur la quantité d'énergie abandonnée dans l'écran, en fonction de l'épaisseur et du nombre atomique de l'élément étudié.

a) Épaisseur. — Le facteur build-up est supérieur à 1 à l'origine. Il décroît, passe par un minimum, avant de devenir fonction croissante de l'épaisseur.

En effet, dans cette expérience, le faisceau initial renferme déjà un pourcentage donné (10 p. 100 environ) de photons dégradés dans la source, d'où un build-up supérieur à 1 aux faibles épaisseurs. Les premières couches du détecteur filtrent progressivement le rayonnement, en arrêtant préférentiellement les composantes les plus molles, d'où la décroissance du build-up, qui matérialise l'appauvrissement, par absorption, des photons dégradés. Cette décroissance est arrêtée vers une valeur minimum par l'apparition d'un rayonnement dégradé au sein même du détecteur ; son intensité croît avec l'épaisseur, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

Il faut insister sur le fait que, dans l'absorption d'un rayonnement γ non monochromatique (cas des sources intenses), et sous de faibles épaisseurs, l'importance des photons diffusés est d'autant plus grande, que l'écran est plus mince. Pour un build-up de 1,5, plus de 30 p. 100 des doses absorbées (26) et (38) sont dues à ce rayonnement dégradé.

b) Nombre atomique de l'élément détecteur. — Sur les courbes de la figure 4, le minimum se déplace

vers la droite quand le nombre atomique diminue ⁽¹⁾. En effet, les sections efficaces d'absorption varient comme le nombre atomique de l'écran, et la composante molle du faisceau est plus pénétrante dans le graphite que dans l'or. Cela revient à dire, que, pour des sources intenses, les photons dégradés par self-absorption participent aux doses reçues, sous des épaisseurs d'autant plus grandes, que le nombre atomique de l'écran est petit.

La calorimétrie permet donc de distinguer si un rayonnement peut être considéré, ou non, comme monochromatique. Nous appliquons ces résultats à une source de ^{60}Co .

Cas du ^{60}Co (Source de 600 mCi).

Les variations du build-up en fonction de l'épaisseur d'absorbant sont données par la figure 5. Les courbes présentent les caractéristiques de l'absorption d'un rayonnement γ monochromatique : B croît avec l'épaisseur en partant de 1 pour des épaisseurs nulles.

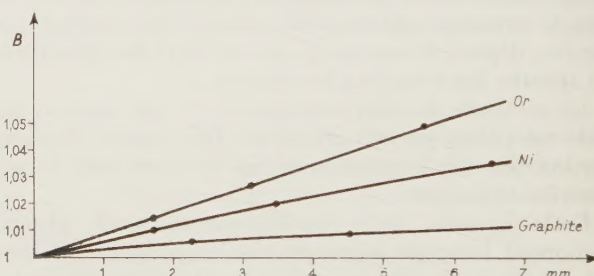


FIG. 5. — Variation du build-up d'énergie absorbée en fonction de l'épaisseur de l'écran. Cas du ^{60}Co .

Rappelons que la source utilisée n'a pas plus de 2 mm de rayon, pour une activité inférieure à 1 curie. Il serait intéressant de vérifier, avec un appareillage adapté, jusqu'à quel volume de matière, les sources de ^{60}Co plus intenses, donnent à l'extérieur, un rayonnement pratiquement assimilable à un faisceau monochromatique.

Étude des sections efficaces d'absorption en fonction du nombre atomique de l'absorbant

La comparaison des phénomènes d'absorption dans différents éléments nous a amené à faire intervenir leur nombre atomique Z.

En effet, pour une énergie E donnée, les sections efficaces d'absorption σ sont fonction du Z de l'absorbant. Les énergies étudiées correspondent à un « effet de paire » négligeable. Mais dans l'effet Compton, la section efficace est proportionnelle au nombre d'élec-

⁽¹⁾ Les épaisseurs limites imposées par l'appareillage n'ont pas permis de le faire apparaître sur la courbe du graphite.

trons de l'atome, tandis que dans l'effet photoélectrique, en première approximation, la section efficace croît à peu près comme Z^3 entre les discontinuités d'absorption et comme Z^5 au-dessus de la raie K (8).

Si σ est la section efficace d'absorption atomique totale, dans un écran contenant N atomes par centimètre cube, le coefficient total d'absorption linéaire est donné par :

$$\lambda = N\sigma.$$

Nous pouvons donc déduire les sections expérimentales d'absorption de la mesure de coefficients d'absorption.

Pratiquement nous étudions l'absorption dans des calorimètres d'épaisseurs différentes. Avec un faisceau monochromatique, la courbe de variation de la fraction de rayonnement transmis, en fonction de l'épaisseur, donne, en représentation semi-logarithmique, une droite dont la pente mesure λ .

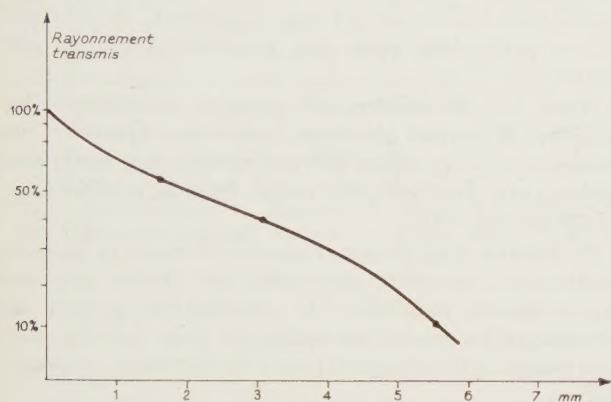


FIG. 6. — Courbe d'absorption d'un rayonnement γ non monochromatique en fonction de l'épaisseur de l'écran. Cas de ^{198}Au et de l'or.

Dans le cas de ^{198}Au et de l'or (fig. 6), l'intensité variable du rayonnement dégradé amène une variation continue du coefficient d'absorption mesuré par la pente de la courbe. Aux faibles épaisseurs, le rayonnement dégradé, émis à l'extérieur de la source, est absorbé plus vite que les photons primaires. Ce « filtrage », qui épargne le rayonnement dur, amène une décroissance continue du coefficient d'absorption, jusqu'à ce que l'apparition du rayonnement dégradé, au sein même du détecteur, inverse le sens de la variation, en augmentant la valeur des coefficients.

Pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec les différents écrans, nous déterminons le coefficient d'absorption moyen λ_m pour des épaisseurs d'or inférieures à 2 mm, qui n'absorbent pas plus de 45 p. 100 de l'intensité du rayonnement incident. λ_m correspond donc à des photons d'énergie moyenne $E_\gamma < 412 \text{ keV}$.

Dans tous les autres cas, les épaisseurs limites, imposées par le dispositif expérimental, maintiennent

l'absorption à un taux inférieur à 33 p. 100 de l'énergie du rayonnement incident. Dans ces conditions, on peut déterminer, avec une bonne approximation, un coefficient d'absorption moyen λ_m sur toute l'épaisseur des calorimètres employés.

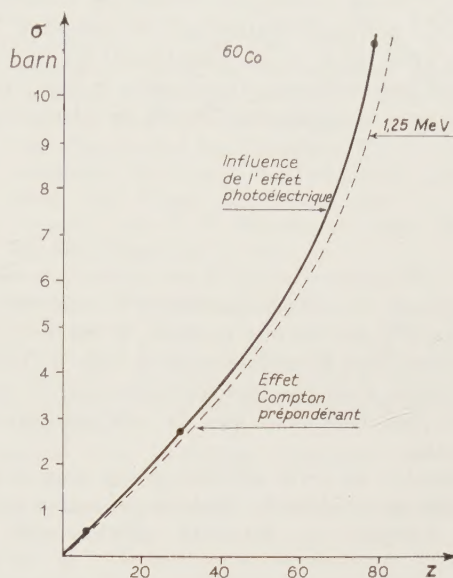


FIG. 7.

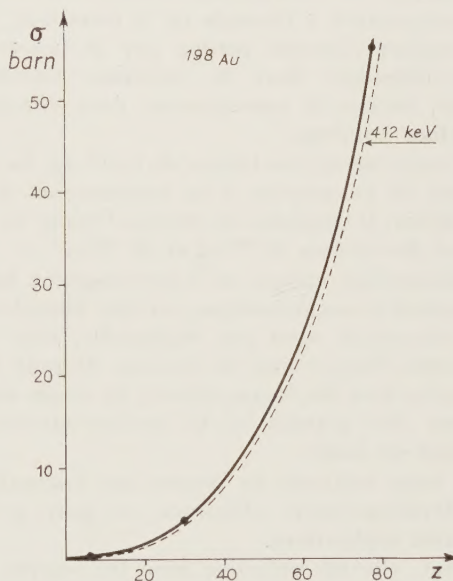


FIG. 8.

FIG. 7 et 8. — Sections efficaces d'absorption en fonction du nombre atomique de l'écran.

Nous donnons, figures 7 et 8, la représentation, en fonction du nombre atomique Z , des sections efficaces expérimentales d'absorption faisant ainsi apparaître les interactions dominantes dans nos conditions expé-

riméntales : l'effet photoélectrique et l'effet Compton dont la proportion varie suivant l'énergie du rayonnement et la nature de l'écran.

En établissant les courbes de variation des sections expérimentales d'absorption, en fonction du nombre atomique Z , nous envisageons l'étude de matières plus complexes : mélanges d'éléments ou composés chimiques. En effet, nous avons maintenant les moyens de déterminer leur coefficient d'absorption et leur Z moyen.

Nous avons ainsi amorcé l'étude du plexiglas, type

de composé organique d'un emploi commode, et susceptible de fournir des éprouvettes, pour la mesure de l'absorption dans les liquides. Mais des dégagements de chaleur spontanés, provenant sans doute de modifications de structure, sous l'action du rayonnement, n'ont pu être complètement éliminés. Les expériences seraient à poursuivre, pour déterminer si le plexiglas peut être un bon détecteur calorimétrique, et dans quelles conditions, ou s'il doit être associé à un détecteur de stabilité confirmée.

CONCLUSION

La méthode de microcalorimétrie γ , mise au point, et appliquée à des sources intenses, a montré, expérimentalement, que le rayonnement γ émis à l'extérieur de ces sources n'est pas monochromatique, et qu'il est d'autant plus complexe que la self-absorption est importante.

L'évaluation de cette self-absorption nous a permis de calculer le nombre de photons primaires qui sont émis à l'origine ou intensité absolue des fortes sources.

Mais les doses absorbées dans un écran épais ne peuvent se déduire, en toute rigueur, du coefficient d'absorption correspondant à l'énergie de la transition, car ce serait négliger l'énergie perdue par le faisceau des photons dégradés, dont la variation continue et complexe, impose la connaissance, dans chaque cas d'un facteur build-up.

Nous avons donné, en termes de build-up, les caractéristiques de l'absorption d'un rayonnement γ , dans l'or, le nickel, le graphite, et amorcé l'étude du plexiglas, avec des sources de ^{198}Au et de ^{60}Co .

La calorimétrie indique si le rayonnement émis est pratiquement monochromatique, ou non. Dans le cas où la self absorption n'est pas négligeable, nous avons fait ressortir l'importance du faisceau dégradé sur les doses reçues dans des écrans minces, et même sous des épaisseurs plus grandes, si le nombre atomique de l'absorbant est faible.

Mais, cette méthode de mesure est susceptible de larges développements ultérieurs, et peut avoir de nombreuses applications.

En effet, elle est utilisable avec les sources radioactives usuelles, ou le faisceau γ d'un accélérateur, et les absorbants les plus divers.

La dose absorbée intégrale peut être obtenue directement, avec un radioélément émettant plusieurs γ d'énergies différentes, et présentant une self-absorption importante.

La précision est fonction de la quantité d'énergie

absorbée dans les calorimètres ; il suffit donc d'accroître la protection aux rayonnements pour pouvoir tester des sources de plusieurs centaines de curies. Une extension géométrique du dispositif expérimental permettrait l'étude de volumes importants de matière, et, en particulier, pour des nombres atomiques peu élevés.

Dans ces conditions, on pourrait déterminer les build-up d'énergie absorbée, sous une épaisseur de plusieurs livres parcours moyens, et avec des matériaux hétérogènes, dont on peut même fixer le nombre atomique moyen (34).

En filtrant et en dirigeant convenablement le faisceau photonique, on peut envisager des études sur des rayonnements parallèles ; la calorimétrie permet de déterminer les conditions optimales pour que les photons restent monochromatiques avec une bonne approximation.

Mais les études en faisceau ouvert présentent également un grand intérêt, du fait que nous mesurons directement l'énergie absorbée.

Nous pouvons ainsi reproduire la géométrie d'une installation quelconque, utilisant le rayonnement émis par une source intense. Un calorimètre détecteur, disposé à des distances et sous des angles variables, donnerait directement les quantités d'énergie distribuées en différents points, compte tenu de la dégradation du faisceau dans les sources, filtres et collimateurs. On aurait ainsi l'atlas des courbes équidoses en valeur absolue (37).

Le principe même de cette méthode en fait le seul appareillage capable d'étalonner les dosimètres de toutes natures.

Enfin, d'une façon plus générale, la détermination des facteurs build-up, et la connaissance des quantités d'énergie retenues par la matière et rendues localement disponibles, devrait permettre d'approfondir l'analyse des phénomènes d'absorption γ et de leurs effets physiques, chimiques et biologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) M. LECOIN et J. ROBERT. — *J. Phys. et Rad.*, 1956, 17, 150 A.
- (2) J. ROBERT. — *Thèse Paris*, 1957.
- (3) I. ZLOTOWSKI. — *J. Phys. et Rad.*, 1935, 6, 244.
- (4) M. LECOIN. — *C. R.*, 1947, 224, 912.
- (5) M. LECOIN, J. ROBERT et M. PICQ. — *J. Phys. et Rad.*, 1962, 23, 12, 15 A.
- (6) J. ROBERT. — *J. Phys. et Rad.*, 1960, 21, 808.
- (7) *Rev. Mod. Phys.*, 1958, 30.
- (8) DAVISSON et EVANS. — *Rev. Mod. Phys.*, 1952, 24-79.
- (9) WHITE. — X. ray. Attenuation Coefficients from 10 keV to 100 MeV. Natl. Bur. Standards, 1952.
- (10) LATTER. KAHN. — R. 240. The Rand Corporation-Santa Monica Calif., 1959.
- (11) FANO. — *Nucleonics*, 1953, 11.
- (12) WYARD. — *Phys. Rev.*, 1952, 87.
- (13) HOWLAND et KREGER. — *Phys. Rev.*, 1954, 95.
- (14) COLGATE. — *Phys. Rev.*, 1952, 87.
- (15) MORRISON. — *Nucleonics*, 1949, 5.
- (16) BRAESTRUP. — *Radiology*, 1946, 46.
- (17) MORGAN. — *J. Appl. Phys.*, 1948, 19.
- (18) EVANS. — *Nuclear Sci. Series Rept.*, 1954, 11.
- (19) FAUST. — *Phys. Rev.*, 1950, 77.
- (20) FOLDY. — *Phys. Rev.*, 1951, 81.
- (21) HIRSCHFELDER et MAGEE. — *Phys. Rev.*, 1948, 73.
- (22) HIRSCHFELDER et ADAMS. — *Phys. Rev.*, 1948, 73.
- (23) PEEBLES et PLESSET. — *Phys. Rev.*, 1951, 81.
- (24) PLESSET et COHEN. — *J. Appl. Phys.*, 1951, 22.
- (25) WIEDENBECK. — *Phys. Rev.*, 1962, 126, 3.
- (26) Grandeurs et unités de rayonnement. Agence internationale de l'énergie atomique. Vienne 1964.
- (27) M. A. VAN DILLA. — The dosimetry of X and γ rays with Liquid-filled Ion Chambers. Ph. D. Thesis Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Mass. 1951 (Chap. XXV, Sect. 3).
- (28) C. GARRET and G. N. WHYTE. — *Phys. Rev.*, 1954, 96, 889 (Chap. XXV, Sect. 3).
- (29) BETHE-SPENCER and U. FANO. — *Phys. Rev.*, 1951, 81.
- (30) WHITE. — *Phys. Rev.*, 1950, 80.
- (31) VAN DILLA et HINE. — *Nucleonics*, 1952, 10, 7.
- (32) SPENCER and FANO. — *Phys. Rev.*, 1951, 81.
- (33) U. FANO. — *Nucleonics*. Vol. 11, n° 9, septembre 1953.
- (34) GOLDSTEIN. — Fundamental aspects of reactor shieldings 1959.
- (35) Rapport 10 a (Radiation quantities and units) de l'I. C. R. U.
- (36) THEODORE ROCKWELL. — Reactor Shielding Design Manuel 1956.
- (37) Atlas of radiation dose distributions. International Atomic Energy Agency. Vienne 1965.
- (38) *Journal Officiel* n° 150 du 30 juin 1966.

